

平成22年 3月31日現在

研究種目： 特定領域研究
 研究期間： 2006 ～ 2009
 課題番号： 18080004
 研究課題名（和文） 超伝導多層導波路の高密度三次元設計と評価

研究課題名（英文） Design and Evaluation of Three-Dimensional Integration of Superconducting Multilayer Waveguides for Localized Electromagnetic Waves

研究代表者

水柿 義直 (MIZUGAKI YOSHINAO)

電気通信大学・電気通信学部・教授

研究者番号：30280887

研究成果の概要（和文）：

本研究課題では、三次元構造超伝導導波路の設計に重要となるインダクタンスの設計方法の開発、ならびに三次元構造にて顕在化してくる多層グラウンドがインダクタンスに及ぼす影響の定量評価について、数値計算および実験をあわせて行いながら遂行した。インダクタンスの解析式の導出、超伝導グラウンド層間コンタクトとデバイスの相対的位置によるインダクタンス変化の評価、単一磁束量子型DA変換器用基本要素回路の設計と動作実証などに成功した。

研究成果の概要（英文）：

Design and evaluation of stripline inductances in multi-layered superconducting integrated circuits are the research targets. The analytical expression for a superconducting stripline sandwiched by two ground planes provided accurate results. Mutual inductances between two superconducting striplines were evaluated. The results demonstrated that the positions of contacts between two ground planes played important roles. Current distribution in a superconducting ground plane was numerically presented. Other results related to Josephson devices including two circuit elements for an SFQ-DAC were also demonstrated.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	11,000,000	0	11,000,000
2007年度	11,800,000	0	11,800,000
2008年度	8,800,000	0	8,800,000
2009年度	4,200,000	0	4,200,000
総計	35,800,000	0	35,800,000

研究分野： 電子工学

科研費の分科・細目： 電気電子工学 電子デバイス・電子機器

キーワード： 超伝導 集積回路 インダクタンス ストリップライン 単一磁束量子

1. 研究開始当初の背景

超伝導集積回路においては、従来から超伝導グラウンドプレーン上に超伝導ストリップラインを配置する高周波導波路が用いら

れてきた。その基本構造については1970年代に解析されており、以来、超伝導集積回路における基礎設計技術として使用されてきている。しかしながら、数千ものデバイスが

集積された超伝導回路が実現されている現在においては、信号導波路同士、また信号導波路と電源ラインとが近接して配置されてきており、従来用いられてきた基本構造のモデルだけでは対応できなくなっている。また、さらなる大規模集積化においては超伝導導波路を多層構造にする必要があるが、その設計手法についてはまだ確立されていない。

2. 研究の目的

本研究課題では、超伝導集積回路における多層導波路の設計技術の確立を当初の目的とした。具体的には次の2項目が本研究課題の主目的であった。

- (1) 数値計算による超伝導三次元構造導波路の物理パラメータ抽出技法の確立。
- (2) 単一磁束量子集積回路応用を目指した超伝導三次元構造導波路の設計技術の確立。

さらに、単一磁束量子局在電磁波を利用した種々の論理デバイスやその他の機能デバイスの設計を行い、回路動作の実証をも目指した。

3. 研究の方法

本研究課題では、個々の検討対象に応じて、次のような研究方法を組み合わせることで遂行した。

- (1) 超伝導体特有の電磁気的特性を加味した解析的計算を行い、その電磁気的パラメータ（インダクタンスなど）を抽出する。
- (2) 超伝導体特有の電磁気的特性を加味した数値計算を行い、その電磁気的パラメータ（インダクタンスなど）を抽出する。
- (3) ジョセフソン接合モデルを含めた単一磁束量子回路の動作を数値シミュレーション（回路モデルを使用したアナログシミュレーションとハードウェア記述言語による論理シミュレーション）し、その特性を評価する。
- (4) Nb 集積チップ上に実現した回路を低温環境下で測定し、上記(1)～(3)の計算結果と比較しながら、その特性を評価する。

数値計算に使用した各種ソフトウェアについては、自作、インターネットから入手可能なフリーソフトウェア、東京大学大規模集積システム設計教育研究センターを介してライセンス提供されるソフトウェアを利用した。

Nb 集積チップについては、上記のソフトウェアにて設計した回路のレイアウトデータを（財）国際超電導産業技術研究センターの超電導工学研究所に提出し、同研究所のニオブ標準プロセスを利用した試作を依頼した。

低温測定については、電気通信大学に備えてある各種計測機器（本特定領域研究の物品費により購入したものを含む）と、電気通信研究所の研究設備センターから供給される液体ヘリウムを利用して行った。

4. 研究成果

(1) 複数の超伝導グラウンドプレーン間に形成される超伝導ループの影響

まず、本研究課題での重要な知見であり、他の研究項目の実験方法や考察における重要な指針となった「複数の超伝導グラウンドプレーン間に形成される超伝導ループがデバイスのインダクタンスに与える影響」の概略について述べる。

複数の超伝導グラウンドプレーンを複数個所で超伝導接続する場合、図1(a)に示すように、グラウンドプレーン間に超伝導ループが形成される。超伝導ループ中の磁束は量子化されるため、その近くにデバイスが図1(b)のように配置されると、グラウンドプレーン間の超伝導ループでの磁束量子化がデバイス内の磁束に影響を及ぼす、言い換えると、デバイスのインダクタンスに影響を及ぼす。

このことから、超伝導グラウンドプレーン間に置かれたデバイスのインダクタンスを正確に見積もるためには、グラウンドプレーン間の接続点とデバイスとの相対位置関係に注意を払う必要がある。一つの設計指針としては、グラウンド間の接続点をジョセフソン接合の近傍に配置する方法があり、この方法によりインダクタンスのバラツキを低減することができる。

この成果については、雑誌論文リストの(4)と(5)にて公表しており、また学会でも報告している。

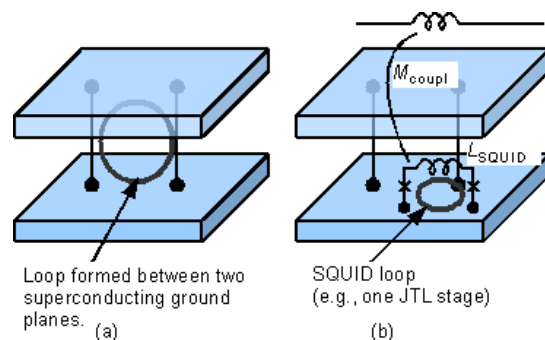


図 1 (a) 超伝導グラウンドプレーン間に形成される超伝導ループの概念図。(b) 超伝導ループ近傍に置かれたデバイス。

(2) 超伝導グラウンドプレーン間に置かれた超伝導ストリップラインのインダクタンスに関する解析式

本研究課題開始以前においては、完全導体で構成されたストリップラインのキャパシタンスに関する解析式は導出されていたものの、超伝導ストリップラインのインダクタンスに関する式の導出は行われていなかった。超伝導体と完全導体とは電磁気学的性質が異なるため、本研究課題では、超伝導ストリップラインの式を導出した。

導出した式の結果を、数値計算結果及び実験結果と比較した。図2において、赤の実線で示されている解析式の結果は、緑の実線で示されている数値計算結果や、+印の実験結果とほぼ同じ値となっている。なお、完全導体に対して得られている式をそのまま適用した場合（紫色の実線）は、3割ほど小さな値となっており、そのままでは使用に耐えないことが分かる。

この成果については、雑誌論文リストの(2)にて公表（予定）しており、また学会でも報告している。

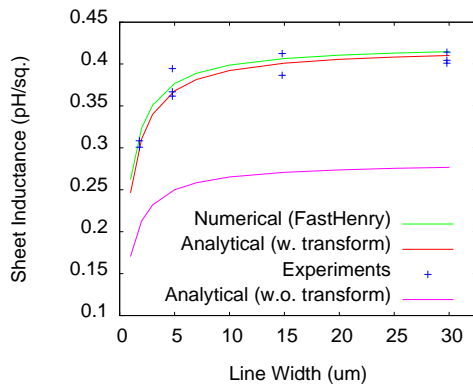


図2 インダクタンス値の計算結果及び実験結果。超伝導ストリップラインの幅の関数として示している。

(3) 超伝導ストリップライン間の相互インダクタンス —超伝導層を介した結合—

超伝導ストリップライン間の相互インダクタンスについては、過去においては主として積層されたライン間について研究されていた。本研究課題では、多層集積回路を想定し、ライン間に超伝導層を挟んだ構造について取り組んだ。

図3にテスト回路の構造を模式的に示す。2つのストリップライン、SQUID line (Nb2) と Control line (Nb4) との間に2nd GP (Nb3) が挟まっている。Nb2 と Nb4 の間の相互インダクタンスを超伝導量子干渉素子 (SQUID) の変調周期から求める。

本研究課題では、特に超伝導グラウンドプ

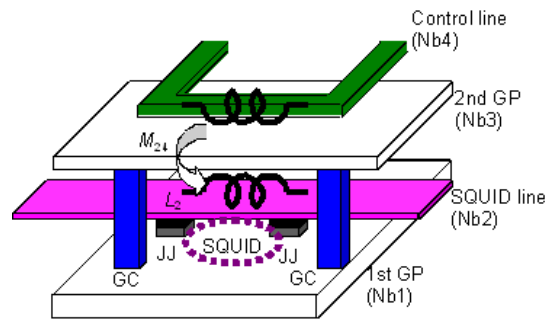


図3 超伝導層を挟んだストリップライン間の相互インダクタンスを測定するテスト回路構造の模式図。

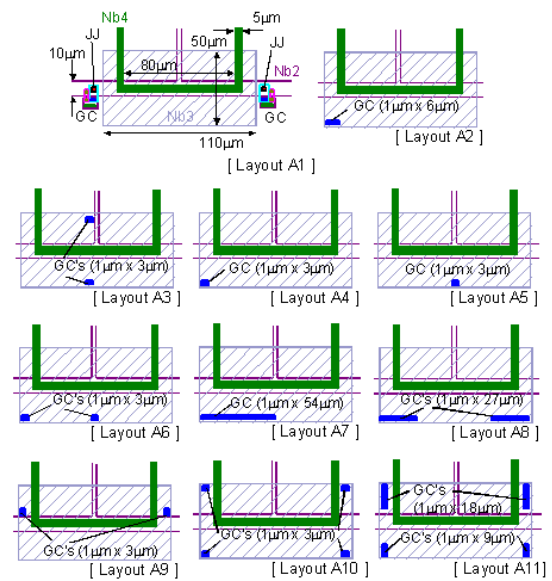


図4 11種類のテスト回路レイアウト（上面図）。青の矩形が2つの超伝導グラウンドプレーンの接続部。

表1 相互インダクタンスの測定結果

Layout	A1	A2	A3	A4	A5	
M_{24} (pH)	0.969	0.988	0.981	0.979	0.976	
Layout	A6	A7	A8	A9	A10	A11
M_{24}	0.883	0.816	0.511	0.315	0.290	0.0817

レーン間の接続部の違いによる相互インダクタンスの変化を調べるため、図4に示す11種類のテスト回路を設計・試作し、測定した。表1にその結果をまとめる。表1から分かるように、接続部の場所や大きさによって、相互インダクタンスが変化する。またこの結果から、4(1)にて述べた「グラウンドプレーン間の接続点とデバイスとの相対位置関係に注意を払う必要がある」ことが分かる。

この成果については、雑誌論文リストの(4)と(5)にて公表しており、また学会でも報告している。

(4) 超伝導ストリップライン間の相互インダクタンス — 同一平面内での結合 —

超伝導多層導波路を高密度集積した場合、同一平面内での相互インダクタンスが無視できなくなることが予想される。そこで、図5に示す3種類の平行ライン間の相互インダクタンスの線路間距離依存性を評価した。

図5(a)は、1層のグラウンドプレーンの上に2本のマイクロストリップラインを配置

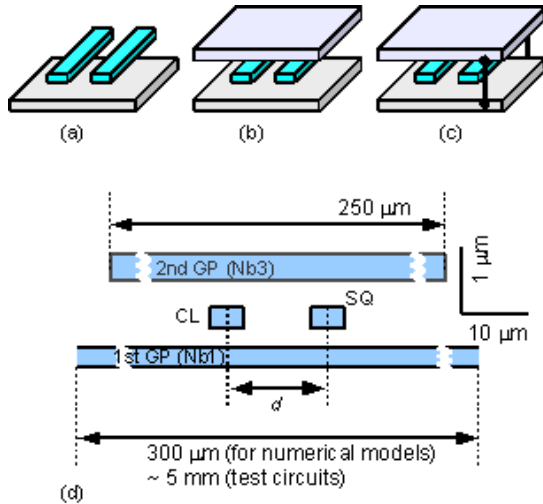


図5 3種類の平行ライン構造の模式図。(a) マイクロストリップライン構造 (MSL 構造)。(b) ストリップライン構造 (上部グラウンド層はフローティング) (FLSL 構造)。(c) ストリップライン構造 (上部グラウンド層と下部グラウンド層を接続) (COSL 構造)。

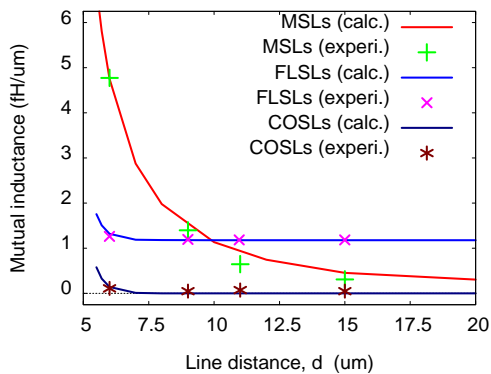


図6 平行ライン間の相互インダクタンスのライン間距離依存性。点は実験結果、実線はそれぞれに対応する数値計算結果を表す。

した構造 (MSL 構造)、図5(b)と図5(c)は、2本のストリップラインが2つの超伝導グラウンドプレーンに挟まれた構造であり、図5(b)では2つのグラウンドプレーンが接続しておらず (FLSL 構造)、図5(c)では2つのグラウンドプレーンが2箇所接続されている (COSL 構造)。

実験結果と数値計算結果を合わせて図6に示す。MSL 構造では、相互インダクタンスがライン間距離に強く依存しており、距離が離れるほど相互インダクタンスが小さくなる。一方、FLSL 構造では、相互インダクタンスの距離依存性は弱く、ほぼ一定とみなせる。MSL 構造での相互インダクタンスのライン間距離依存性は以前より知られていたものであるが、2つの超伝導グラウンドプレーンで挟まれたストリップラインに関しては、過去に報告例が無く、本研究課題にて初めて明らかとなった。距離依存性が弱い原因は、磁束が超伝導グラウンドプレーン間に閉じ込められることにある。COSL 構造でも相互インダクタンスは距離によらずほぼ一定であるが、その絶対値を FLSL と比較すると、小さくなっている。これは、4(1)にて述べた「グラウンドプレーン間の接続点とデバイスとの相対位置関係」に起因するものである。

この成果については、雑誌論文リストの(1)と(3)にて公表 (1)は予定) しており、また学会でも報告している。

(5) 単一磁束量子型デジタルアナログ変換器用基本要素回路の設計と動作実証

実際の単一磁束量子回路の設計と動作実証として、単一磁束量子型デジタルアナログ変換器の基本構成要素である電圧増倍器 (Voltage Multiplier: VM) とパルス数増倍器 (Pulse Number Multiplier: PNM) の高機能化に取り組んだ。

VMについては、従来の「入力電圧をそのままコピーする」1倍のセルを改良し、入力電圧を4倍するセルを考案した。レイアウト設計・試作を経て、その動作を検証したところ、数値計算による予測よりも動作マージンが小さかったものの、電圧を4倍する基本動作を確認することができた。この成果については、学会にて報告しており、今後雑誌論文として投稿する予定である。

もう一つのPNMについては、従来は固定倍率であった回路を改良し、増倍率を可変できる回路構成を考案した。倍率制御用の回路を付加し、2, 4, 6, 8倍の4段階に増倍率を変えることのできる回路を設計・試作した。測定の結果、その基本動作を確認することができた。この成果については、学会にて報告しており、今後雑誌論文として投稿する予定である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計5件)

- (1) Y. Mizugaki, A. Kawai, R. Kashiwa, M. Moriya, and T. Kobayashi, “Mutual coupling between two superconducting strip lines horizontally-placed in niobium integrated chips,” accepted for publication in Journal of Physics: Conference Series, 2010. (査読有り)
- (2) Y. Mizugaki, A. Kawai, R. Kashiwa, M. Moriya, and T. Kobayashi, “Analytical Inductance Calculation of Superconducting Stripline by Use of Transformation into Perfect Conductor Model,” accepted for publication in IEICE Transactions on Electronics, vol. E93-C, no. 4, 2010. (査読有り)
- (3) 河合章生, 柏竜太, 守屋雅隆, 小林忠行, 水柿義直, “ニオブ集積回路における平行線路間の相互インダクタンス評価,” 電子情報通信学会和文論文誌 C, vol. J92-C, no. 9, pp. 523-530, 2009. (査読有り)
- (4) Y. Mizugaki, R. Kashiwa, A. Kawai, M. Moriya, K. Usami, and T. Kobayashi, “Magnetic Isolation Enhanced by a Superconducting Loop in Josephson Integrated Circuits,” Japanese Journal of Applied Physics, vol. 48, no. 7, pp. 073001-1-5, 2009. (査読有り)
- (5) Y. Mizugaki and R. Kashiwa, “Magnetic Shielding Effect of Grounded Superconducting Niobium Layers,” Journal of Physics: Conference Series, vol. 97, pp. 012056-1-5, 2008. (査読有り)

[学会発表] (計21件)

- (1) 田中丈之, 齋藤淳, 小林忠行, 守屋雅隆, 水柿義直, 前澤正明, “Stacked-SQUIDを利用した電圧増倍回路の動作検証,” 2010年電子情報通信学会総合大会, 2010年3月16日 東北大(仙台市)
- (2) 齋藤淳, 田中丈之, 守屋雅隆, 小林忠行, 水柿義直, 前澤正明, “DA変換器応用を目指したパルス数可変増倍回路の設計と動作検証,” 電子情報通信学会技術研究報告(超伝導エレクトロニクス), SCE2009-24, 2010年1月20日, 機会振興会館(東京)
- (3) Y. Mizugaki, A. Kawai, R. Kashiwa, M. Moriya, and T. Kobayashi, “Mutual Coupling between Two Superconducting

Strip Lines Horizontally-Placed in Niobium Integrated Chips,” 9th European Conference on Applied Superconductivity, Dresden, Germany, September 17, 2009.

- (4) J. Saito, R. Kashiwa, A. Kawai, T. Tanaka, M. Moriya, T. Kobayashi, Y. Mizugaki, and M. Maezawa, “Design and Operation of 2ⁿ-fold Variable SFQ Pulse Number Multiplier,” Int. Superconductive Electronics Conf. 2009, Fukuoka, Japan, June 18, 2009.
- (5) T. Tanaka, T. Kobayashi, M. Moriya, Y. Mizugaki, and M. Maezawa, “Stacked-SQUID-based Voltage Multiplier Cell Generating Twofold or Fourfold Voltage,” Int. Superconductive Electronics Conf. 2009, Fukuoka, Japan, June 18, 2009.
- (6) 水柿義直, 柏竜太, 河合章生, 守屋雅隆, 小林忠行, “2ヶ所で接続された2層グラウンド間での磁束量子化と磁気遮蔽効果,” 2008年電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2008年9月19日, 明治大(川崎市)
- (7) 河合章生, 柏竜太, 田中丈之, 守屋雅隆, 小林忠行, 水柿義直, “近似モデルを用いた超伝導薄膜積層構造のインダクタンス計算,” 2008年電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2008年9月19日 明治大(川崎市)

[その他]

領域のホームページ

<http://www.yoshilab.dnj.ynu.ac.jp/tokutei/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

水柿 義直 (MIZUGAKI YOSHINAO)
電気通信大学・電気通信学部・教授
研究者番号: 30280887

(2) 研究分担者

守屋 雅隆 (MORIYA MASATAKA)
電気通信大学・電気通信学部・助教
研究者番号: 80282911

小林 忠行 (KOBAYASHI TADAYUKI)
電気通信大学・電気通信学部・教授
研究者番号: 00123969